Determinación de las pérdidas dieléctricas en transformadores con frecuencia y temperatura variable.

Lars Arvidsson, VPdiagnose, Suecia; Eduardo Briosso, CTM Salto Grande.

***Resumen*-- Se realizaron determinaciones de aislación en varios transformadores de 500 kv usando dos equipos: Un Analizador de Aislación IDA200 (actualmente fabricado por Pax Diagnostics como IDAX-206), y un Analizador LEMKE Diagnostics modelo LDIC.**

El IDA200 usa 140 VAC, la frecuencia es barrida desde 1000 Hz hasta 0.001 Hz. El límite inferior se puede setear en un valor más alto para que el tiempo de ensayo sea mas corto. El método de ensayo se conoce como Frequency Domain Spectrography (FDS). El LDIC permite variar la tensión de salida entre 0.1 y 20 kv y la frecuencia entre 30 y 400 Hz. Dada la capacidad de las unidades ensayadas, si se trabaja a 10 kv, se tiene una frecuencia máxima de unos 70 Hz debido a la limitación de corriente.

Los resultados del IDA 200 muestran –en varias unidades- valores altos de conductividad de la aislación sólida. Este diagnóstico coincide con hallazgos en desarmes de fallas en unidades "hermanas". Se encontró entonces que la aislación de papel estaba contaminada mostrando una alta conductividad en algunas áreas.

Se comparan y comentan los resultados de las mediciones.

Se discute la utilidad y limitaciones del uso del rango de frecuencias pequeño para evaluar el estado de la aislación. Esto basado en el comportamiento observado de la función pérdidas dieléctricas - tgδ - y su correlación con otros estimadores del estado/humedad de la aislación.

***Palabras Clave*-- FDS, DFR, Espectroscopía dieléctrica, tangente delta, humedad de la aislación sólida, estado de la aislación sólida.**

I. Introducción

Tuvimos problemas con una población de 24 transformadores elevadores de generador (GSU) de 500 kv. Ocurrieron 5 fallas y la mayoría de las unidades originales fueron reemplazadas. Las restantes, idénticas a las demás, aun teniendo un primario libre, y por tanto consideradas en un mejor estado que las reemplazadas, comparten los problemas comunes de la población. Necesitamos encontrar métodos para entender esto y extender la vida remanente de las unidades.

El desarme de las fallas mostró Cu2S en la aislación de papel. El fabricante pudo reproducir la alta conductividad superficial del papel en un experimento de laboratorio. Tomó varios meses y se usó aceite deteriorado y 150 oC de temperatura. El mismo experimento con 140 oC y/o aceite nuevo no dio alteraciones.

Las unidades que decidimos mantener operan a temperaturas mas bajas que sus unidades gemelas que fueron reemplazadas y sus aceites se han deteriorado menos, por tanto estimamos están en mucho mejor estado que las últimas . Los ensayos con IDA200 estaban dirigidos hacia evaluar/confirmar esto.

II. Antecedentes

El grupo de unidades ensayadas comparte los problemas de las unidades "hermanas" que fueron reemplazadas. Las unidades que mantenemos, Bancos 7 y 8, son GSUs de dos primarios donde uno de ellos está libre. El bobinado de 500 kv estuvo/está siempre cargado a menos de la mitad de su corriente nominal. Todas las unidades que operaban a plena carga fueron reemplazadas entre 1999 y 2001 después que ocurrieron varias fallas. Las unidades falladas fueron desarmadas y se encontró que la aislación era conductiva superficialmente en algunas áreas.

Ensayamos las tres unidades del Banco 8, dos unidades hermanas de dos generadores que están en servicio y dos de las reemplazadas. Las unidades son acorazadas y del mismo diseño. Su estado/edad es muy diferente como se puede ver en la Tabla I.

Identificación	Fab/En serv.	En Serv.	tgd aceite @90 oC, %	Tgd aceite @20 oC, %	Aceite proce_ sado
B2S	1999/1999	1999-	0.52	0.09	NO
B2T	1984/1996	1996-	0.54	0.09	NO
B8R	1979/1980	1980-	7.8	0.47	NO
B8S	1979/1980	1980-	7.5	0.43	NO
B8T	1979/1980	1980-	8.5	0.38	NO
Reserva_MD	1979/1980	1980-1999	3.1	0.19	aceite Nuevo en 1997
Reserva_MI	1979/1980	1980-1999	15.4	0.83	NO

Tabla. I
Tgd del aceite antes del proceso de Hot Oil Spray

Las unidades son: GSU, 13.8 / 13.8 / 500/raíz(3) kv, 50/50/100 MVA, Shell Type, Monofásicas.

III. MÉTODOS DE ENSAYO

Las unidades mencionadas arriba fueron ensayadas con dos Analizadores de Aislación:

- IDA200
- LDIC

IV. RESULTADOS DE LA INVESTIGACION DEL FABRICANTE CON LOS MATERIALES RECUPERADOS DE LOS DESARMES

El fabricante detectó la formación de sulfuro de cobre (Cu2S) en muestras de papel tomadas de la primera bobina de alta tensión. El Cu2S fue identificado por medio de análisis XMA. La característica del cobre y azufre se muestra en la Figura 1.

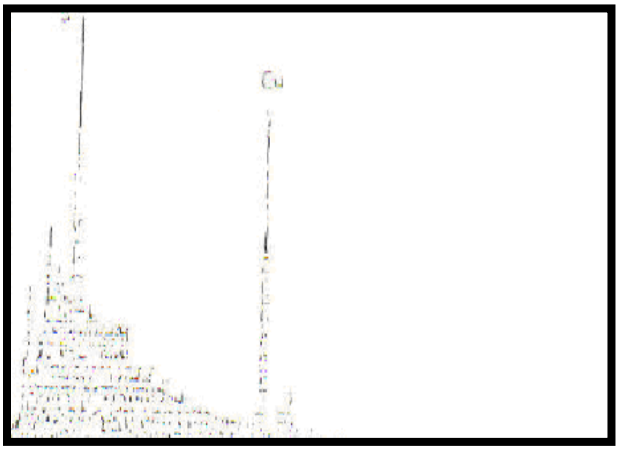

Fig. 1. Característica de cobre y azufre, X – ray.

Otro hallazgo importante fueron las ceras x en los cartones que cubren la placa estática. Esto se verificó solo en las unidades con diagnóstico de descargas parciales (alta generación de H2 & CH4). Ver foto 1.

Foto. 1. Ceras X en la aislación.

V. RESULTADOS DE LAS MEDICIONES CON IDA200 E INTERPRETACIÓN.

Mediciones hasta la frecuencia más baja toman mucho tiempo, por tanto se midió hasta .0022 Hz (45 min.) o hasta 0.001 Hz (1 h, 15 min.) para una sola configuración. La experiencia ha probado que la configuración a elegir para esta medición es entre bobinados usando el tanque como guarda [1]. En este caso medimos hasta 0.001 Hz entre el bobinado de alta (H) y los dos bobinados de baja conectados juntos (L+T). También se midió entre alta (H) y tierra, y entre las dos bajas (L+T) y tierra, esta vez llegando hasta 0.01 Hz, acortando considerablemente el tiempo de ensayo (10 min.).

El contenido de humedad estimado con el software MODS que viene con instrumento IDA/IDAX junto con otros datos se presenta en la tabla 2.

Identificación	CH tgd @ 50Hz %	CH(L+T) tgd @ 50Hz %	C(L+T) tgd@ 50Hz %	Temp. aceite	Humedad % MDW
B2S	.43	.36	.45	16.5	0.5
B2T	.44	.33	.43	18.0	0.5
B8R	.48	.49	.81	18.5	2.3
B8S	.50	.50	.80	20.0	2.2
B8T	.53	.56	.90	19.5	2.2
Repuesto_MD	.58	.45	.51	10.0	2.1
Repuesto_MI	1.4	.62	.64	21.0	2.3

TABLA II
CH = ALTA A CUBA; CH(L+T) = ALTA A BAJA 1 Y 2 UNIDAS; C(L+T) = BAJA 1 Y 2 A CUBA.

El software MODS esta diseñado para estimar el contenido medio de humedad en la aislación de celulosa y los resultados se correlacionan bien con los valores esperados de humedad (unidades que operaron respirando a la atmósfera por unos 20 años). Sin embargo, resultó obvio usando el software que el ajuste era muy pobre indicando que algo influenciaba la medida además de la humedad. Esto se notó en las unidades con humedad estimada > 2%.

El software MODS trabaja con las curvas C(f) y tgδ(f), -o ε' (f) y ε" (f)- ajustando un modelo con cuatro variables: dos geométricas (X e Y) que describen el % de aislación sólida en la dirección longitudinal y transversal, la conductividad del papel y la del aceite. Tantos parámetros como sean conocidos se pueden ingresar, alternativamente el programa trata de calcularlos para ajustar los datos medidos. La humedad del papel es la salida, y es estimada a partir de un modelo que suministra datos dieléctricos en función de la frecuencia y humedad.

Con respecto a los valores de conductividad del aceite usados en el ajuste, estos son similares a los calculados a partir de la tgd del aceite a 20 oC, excepto para los valores más bajos (Caso B2S y B2T) donde los valores reportados por

el software fueron bastante mas bajos que los medidos/calculados en el laboratorio . Esto se explica porque nuestro equipo de tgδ de laboratorio tiene baja exactitud en valores bajos como los del aceite nuevo a 20 oC.

El "Repuesto_MD" es una de las unidades reemplazadas. Su aceite fue cambiado después de un corto proceso de HOS que puede haber secado algo la aislación.

El diagnóstico del fabricante del IDA200 está de acuerdo con los hallazgos en unidades falladas en cuanto estimó que había algo inusual en el papel involucrando una conductancia alta.

En las Figuras 4 al 7 se pueden ver resultados de dos unidades muy diferentes.

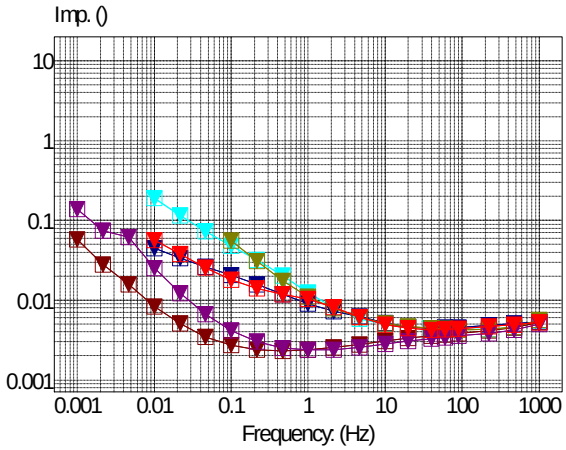

Fig. 4. B2S & B2T, tgδ(f)

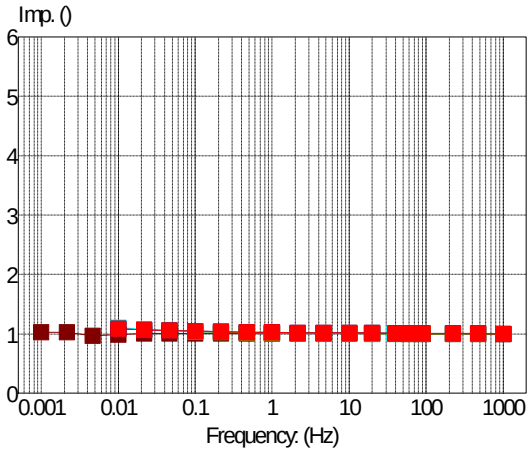

Fig. 5. B2S, C(f)/C(1000)

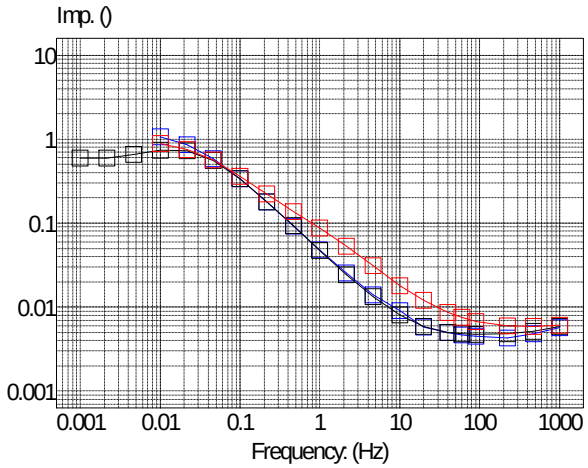

Fig. 6. B8R, tgd(f)

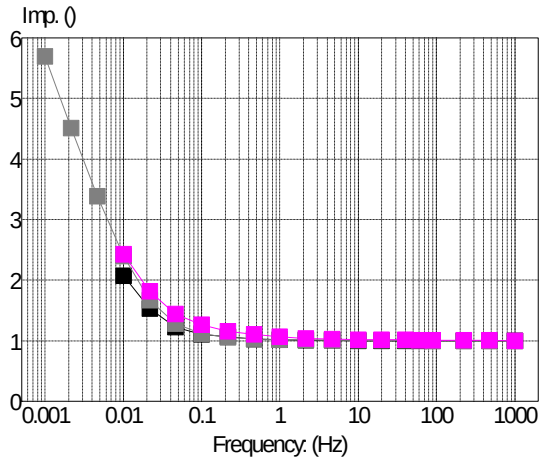

Fig. 7. B8R, C(f)/C(1000)

Notar la diferencia entre las unidades B2S y B2T (B2S es mas nueva). Notar también la diferencia entre B2S (B2T es similar) y B8R con respecto a la tgδ y a la Capacidad relativa en bajas frecuencias.

VI. RESULTADOS DE LAS MEDICIONES CON LDIC

A. Comparación con los valores medidos con IDA200.

Las mismas unidades fueron medidas con el analizador de aislación LDIC a 10 kv y 50 Hz. Los valores de tgδ entre alta y baja medidos con ambos instrumentos, excepto por el B2T, prácticamente coinciden.

Unit	CH(L+T) Tgd 50Hz, %	Temp. Aceite	Humedad Aislación % MDW	CH(L+T) Tgd 50Hz %	Temp. Aceite
	IDA200			LDIC	
B2S	.36	16.5	0.5	0.31	28
B2T	.33	18.0	0.5	0.24	29
B8R	.49	18.5	2.3	0.49	20
B8S	.50	20.0	2.2	0.49	23
B8T	.56	19.5	2.2	0.54	27
Reserva_MD	.45	10.8	2.1	0.42	24-32
Reserva_MI	.62	21.0	2.3	0.58	

TABLA III
COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON IDA Y LDIC

Solo se comparan los valores de tgδ entre alta y baja ya que esta magnitud parece independiente de la temperatura (al menos para 20 oC +/- 10 oC). Los valores de Capacidad concuerdan casi perfectamente.

Los valores a 50 Hz. Fueron derivados midiendo a distintas frecuencias y ajuntando funciones del tipo:

$tg\delta(f) = Cte_1 * f \text{ ^ } Cte_2$ (1)

$C(f) = Cte_3 * f \text{ ^ } Cte_4$ (2)

Esto se muestra en la figura 8.

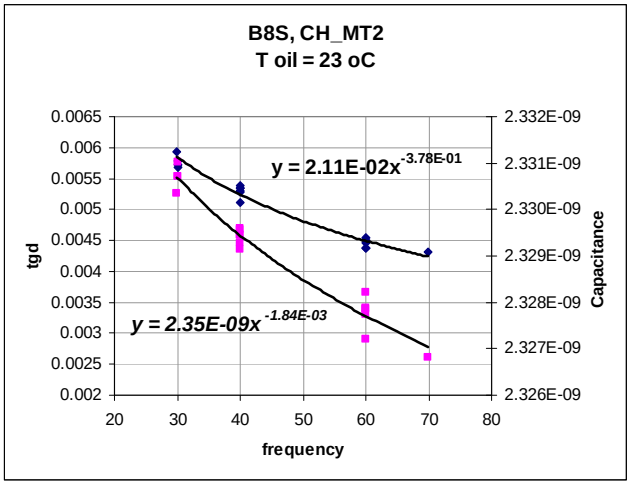

Fig. 8. Capacidad y tgd en función de la frecuencia; Alta a Baja tensión 2.

B. Modelo propuesto para los resultados con LDIC.

En este caso los resultados están disponibles en un rango mucho menor de frecuencias (f). A continuación comentamos los resultados obtenidos en las unidades mencionadas antes, y también en otras unidades de 500 kv. El analizador de aislación mencionado se viene usando desde 2004 y al principio registrábamos simplemente el promedio entre dos mediciones a 40 y 60 Hz. Notamos que en caso de equipos nuevos o en buena condición tgδ(f) era creciente, mientras que lo opuesto era cierto en equipos envejecidos (principalmente en equipos con muchos años respirando a la atmósfera). Se obtienen curvas como las de la figura donde se nota una variación mayor de la tgδ con la frecuencia para temperaturas altas.

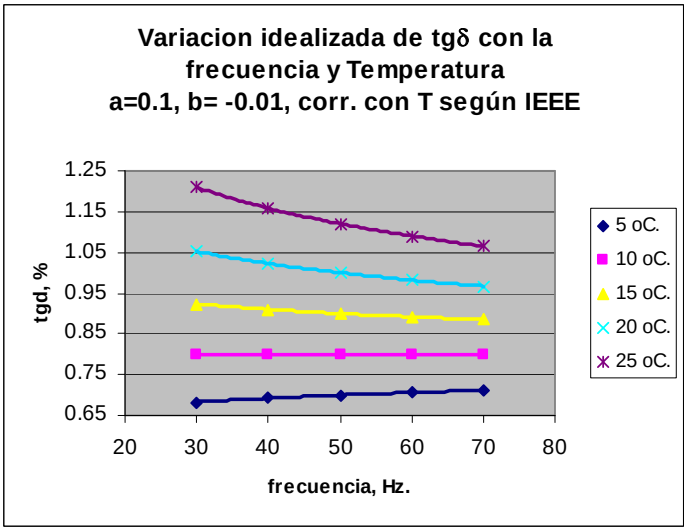

Fig. 9. Variación típica de tgd en función de la frecuencia y temperatura

En la mayor parte de los casos las funciones del tipo (1) y (2) dan un buen ajuste. Para un pequeño número de casos se observó para tgδ(f) un mínimo cerca de 60 Hz. El ajuste en el caso de la capacidad siempre es muy bueno. Para este último se cumple: -4.5 e-3 <= Cte_4 < = - 1.5 e-3

Con respecto a la variación con la temperatura, como se sabe, tgδ(T) es creciente. Se aconseja medir a cerca de 20 oC. y cuando esto no es posible se usan tablas de corrección como por ejemplo la de la Norma IEEE. Hemos visto que los factores de corrección no siempre son válidos, por ejemplo las mediciones entre bobinados dan resultados casi constantes independientes de la temperatura. (T = 20 oC +/- 10 oC, unidades tipo shell).

La segunda observación es que el estado de la aislación (humedad o contaminación) afecta la variación de tgδ con la frecuencia. Esto se ve claramente en equipo nuevo (papel seco) que da tgδ(f) creciente, mientras que en equipos envejecidos –la humedad del papel se supone aumenta a una tasa de entre 0.05 y 0.2 % por año- se cumple lo contrario.

También se ve en equipos que han tenido un proceso de secado tipo HOS (hot oil spray) seguido por cambio de aceite. En este caso las tgδ entre bobinados decrecen y el exponente (Cte_2) crece.

El incremento del exponente se atribuye al secado de la aislación ya que en varias unidades el aceite reemplazado tenía buenas propiedades (baja tgδ).

De esto se infiere que una primera evaluación de la humedad de la aislación se puede realizar basada en los resultados dieléctricos a frecuencias entre 30 y 70 Hz. El método no es universal pero, basta con que se aplique a unidades del mismo diseño para que sea de utilidad. La idea es escribir el exponente Cte_2 de (1) como:

$$Cte_2 = a + b * T \quad (3)$$

Siendo **a** y **b** constantes y T la temperatura del aceite (Top oil). Se ha visto que se cumple aproximadamente:

b ~ constante.

a = **a**(humedad del papel).

Valido para equipo de un mismo diseño. Por tanto Cte_2 (T) es una recta que se desplaza paralelamente con al humedad del papel. En este caso basta obtener Cte_2(T1) para estimar su valor a otra temperatura T0.

C. Unidades ensayadas.

Las siguientes unidades fueron ensayadas a diferentes temperaturas con el equipo LDIC:

- Reactor de 500 kv, 16.7 MVar, Identificación: SGU fase C.
- B8S, mencionado en el punto 1.
- Repuesto_ MD. Ídem anterior.
- B7R.

Se listan los resultados para el ajuste de la función exponente (Cte_2) para CHT.

Unidad	**a**	**B**	Exponente @20oC.	Humedad a partir del dew point, %	Humedad a partir de resultados IDA	ppm de agua en aceite norm a 20oC
B7R antes y después de la regeneración del aceite, 5/2006	-0.28	-0.009	-0.46	1.5		
B7R, 11/2004	-0.24	-0.009	-0.42	1.5		
Repuesto_MD	0.11	-0.007	-0.04		2.3	
B8T, 2004	-0.065	-0.012	-0.31		2.2	
B8R post HOS y cambio de aceite	0.15	-0.016	-0.18			7
B8T post HOS y cambio de aceite			-0.16			6
B8S post HOS y cambio de aceite.	0.14	-0.012	-0.10			6
Reactor 16.7 MVAR	0.165	-0.010	-0.04	> 3 % (*)		

TABLA IV
EXPONENTE D ELA FUNCIÓN TGD(F) Y ESTIMACIONES DE HUMEDAD DEL PAPEL.

De seis unidades (bancos 7 y 8) tratadas con HOS, se verificó en todas una mejora en las pérdidas dieléctricas con una excepción. La unidad B7R mostró el comportamiento opuesto, pensamos que o bien ocurrió un ingreso de humedad o la contaminación se redistribuyó de alguna forma que empeoró la aislación entre bobinados. Esta unidad muy probablemente tenga "ceras x" ya que tuvo diagnóstico de descargas parciales por un largo tiempo. Esta unidad ha tenido un incremento en la tgδ entre bobinados, consistente con un decrecimiento de la constante **a** con el tiempo.

El pasivado del aceite en 2006 provocó un incremento en la tgδ del aceite que se corrigió haciendo circular el aceite por tierras de fuller [2].

Las unidades del banco 8 muestran el efecto del secado por HOS. Lo mismo para el Repuesto_MD.

Con respecto al reactor, la función a (humedad del papel) es diferente.

El rango de valores observados de **b** entendemos que no invalida el método ya que, para un cambio de 10 oC, el error en el exponente sería de aprox. +/- 0.05, que es pequeño.

Se necesitan mas datos para correlacionar la constante **a** con la humedad del papel. Por supuesto, **a** es también una función de la conductividad del aceite, pero suponemos que la sensibilidad es baja.

VII. CONCLUSIONES

El análisis de los resultados con IDA200 se corresponde con los hallazgos en unidades gemelas falladas: La aislación de papel está contaminada con especies químicas conductivas, el Cu2s puede ser uno de ellos [2].

Los resultados a 140 volt coinciden bastante bien con los mismos a 10 kv y 50 Hz.

El proceso de HOS realizado en los Bancos 7 y 8 produjo un secado importante que se corresponde con la mejora de la aislación (cambio en el valor y exponente de tgd entre bobinados) [3].

La tgδ entre bobinados parece ser independiente de la temperatura al menos dentro de cierto rango.

Mediciones en un rango estrecho de frecuencias (30 a 70 Hz) parecen proveer una indicación de la conductividad del papel, por supuesto esto es una simplificación. El modelo usado por el IDA200 es mucho más exacto y se recomienda.

VIII. AGRADECIMINETO

Agradecemos a Peter Werelius de Pax Diagnostics por su apoyo durante este proyecto.

IX. REFERENCIAS

[1] Gubanski S, et.al, "Reliable Diagnostics of HV Transformer Insulation for Safety Assurance of Power Transmission System REDIATOOL - a European Research Project", D1-207, CIGRE session 2006, Paris

[2] E. Briosso, F. Marull, G. Momesso, C. Chiarella, Pasivado en unidades con aislación envejecida, XII ERIAC D1.04.

[3] E. Briosso, F. Marull, G. Momesso, Experiencia con Tratamiento con HOS en descontaminación y reducción de DPs en Transformadores, XII ERIAC A2.01.

X. BIOGRAFÍAS

Eduardo Briosso. Graduado en la Universidad de la República en 1981 como Ingeniero Industrial, Opción Electrónica. Se desempeñó en varias posiciones relacionadas con la trasmisión de energía en alta tensión. Comenzando en el Departamento de Protecciones Eléctricas de Trasmisión en UTE –empresa estatal de electricidad Uruguaya-, luego en la CTM de Salto Grande (Empresa Binacional Argentino-Uruguaya) donde se desempeñó en el sector Protecciones y Mediciones, luego en Ingeniería de Operación y a partir de 2004 es Jefe de Departamento Subestaciones.
Su dirección de e-mail es: briossoe@saltogrande.org

Lars Arvidsson, nació en 1954 en Lund, Suecia. Graduado en 1979 como M Sc Chemical Process Engineering. Empleado previamente en ASEA, ABB y Vattenfall en Suecia. Es dueño, fundador y Gerente General de VPdiagnose, laboratorio independiente que realiza investigación y consultoría en la industria eléctrica. Ha aplicado varias técnicas de extensión de vida, así como nuevos métodos de diagnóstico de transformadores.
Su e-mail es: lars.arvidsson@petroleumkemi.se